

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 622.867.322

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-101-109>

Поступила в редакцию 30.04.2021

Received 30.04.2021

С. Г. Ехилевский<sup>1</sup>, Е. П. Потапенко<sup>2</sup><sup>1</sup>*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Унитарное предприятие «Витебскоблгаз», Витебск, Республика Беларусь*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ИЗОЛИРУЮЩЕГО ДЫХАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОМ КИСЛОРОДЕ

**Аннотация.** Обосновано, что главные перспективы совершенствования изолирующих средств защиты дыхания связаны с химическим способом резервирования кислорода. Для повышения эффективности его использования необходимо задействовать ресурс мертвого слоя хемосорбента и предотвратить спекание гранул кислородсодержащего продукта под действием экзотермического тепла. Это достигается более быстрым импульсным пропусканием выдыхаемого воздуха через лобовые слои хемосорбента и его медленной фильтрацией через остальную часть регенеративного патрона. Для оценки эффективности такого технического решения построена математическая модель регенерации воздуха в изолирующем дыхательном аппарате с неравномерной скоростью фильтрации выдоха через регенеративный патрон. Получены зависимости от времени и координаты концентрации молекул CO<sub>2</sub> в воздушном потоке и доли использования защитного ресурса регенеративного патрона. С помощью численных экспериментов определена оптимальная для предотвращения спекания гранул координата скачка скорости фильтрации воздушного потока. В зависимости от величины демпфирования давления на выдохе и вдохе для респиратора РХС определен прирост защитного действия аппарата и рассчитано снижение мощности источников экзотермического тепла в лобовых слоях кислородсодержащего продукта. Полученные результаты подтверждают эффективность рассматриваемых усовершенствований конструкции, благодаря чему могут быть повышены надежность изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде и эффективность использования их защитного ресурса.

**Ключевые слова:** изолирующий дыхательный аппарат, регенерация воздуха, кислородсодержащий продукт, экзотермическое тепло, динамика хемосорбции

**Для цитирования:** Ехилевский, С. Г. Оптимизация теплового режима изолирующего дыхательного аппарата на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, Е. П. Потапенко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 101–109. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-101-109>

Stepan G. Ekhilevskiy<sup>1</sup>, Evgeniy P. Potapenko<sup>2</sup><sup>1</sup>*Polotsk State University, Novopolotsk, Vitebsk region, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Unitary Enterprise “Vitebskoblgaz”, Vitebsk, Republic of Belarus*

## OPTIMIZATION OF THE THERMAL REGIME OF THE INSULATING BREATHING APPARATUS ON CHEMICALLY BOUND OXYGEN

**Abstract.** It is proved that the main prospects for improving the insulating means of respiratory protection are related to the chemical method of oxygen reservation. To increase the efficiency of its use, it is necessary to use the resource of the dead layer of the chemisorbent and prevent the sintering of the granules of the oxygen-containing product under the action of exothermic heat. This is achieved by faster pulsed passage of exhaled air through the frontal layers of the chemisorbent and its slow filtration through the rest of the regenerative cartridge. To evaluate the effectiveness of such a technical solution, a mathematical model of air regeneration in an insulating breathing apparatus with an uneven rate of exhalation filtration through a regenerative cartridge is constructed. The dependencies on the time and coordinate of the concentration of CO<sub>2</sub> molecules in the air stream and the share of the use of the protective resource of the regenerative cartridge are obtained. Using numerical experiments, the optimal coordinate of the air flow filtration rate jump was determined to prevent sintering of the granules. Depending on the amount of pressure damping on exhalation and inspiration for the RHS respirator, an increase in the protective effect of the device was determined and a decrease in the power of exothermic heat sources in the frontal layers of the oxygen-containing product was calculated. The results obtained confirm the effectiveness of the considered improvements of the design, which make it possible to increase the reliability of insulating breathing apparatus on chemically bound oxygen and to increase the efficiency of using their protective resource.

**Keywords:** self-contained breathing apparatus, regeneration of air, oxygen-containing product, exothermic heat, dynamics of chemisorption

**For citation:** Ekhilevskiy S. G., Potapenko E. P. Optimization of the thermal regime of the insulating breathing apparatus on chemically bound oxygen. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 101–109 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-101-109>

**Введение.** При наличии в воздухе сразу нескольких, не имеющих универсального фильтра, отравляющих веществ или при недостатке кислорода для защиты органов дыхания необходимы изолирующие респираторы и самоспасатели [1]. В частности, такие ситуации могут возникать при аварийной утечке газа, пожаре в замкнутом пространстве, когда выгорает или вытесняется кислород и выделяются ядовитые продукты горения.

Регенерация воздуха в изолирующих дыхательных аппаратах предполагает связывание выдыхаемого углекислого газа и обогащение кислородом поступающего на вдох воздуха. Наиболее перспективным способом резервирования кислорода является химический, ибо плотность твердых веществ в тысячу раз выше, чем у газов, а стальные баллоны не выдерживают давления более 250 атм. При этом они в 6 раз тяжелее своего содержимого в отличие от жестяной оболочки регенеративного патрона, снаряженного пористыми гранулами надпероксида калия.

В процессе фильтрации воздуха через слой таких гранул осуществляется хемосорбция молекул  $\text{CO}_2$  и выделяется в 1,5 раза больше молекул кислорода



Такая стехиометрия близка к идеальной для физиологии человека, ибо в легких при одном вдохе-выдохе связывается в полтора раза больше молекул кислорода, чем выделяется молекул  $\text{CO}_2$  [2]. Это означает, что расход зарезервированного в регенеративном патроне кислорода регулируется автоматически в зависимости от физической нагрузки человека. Это позволяет обойтись без имеющегося в баллонных респираторах легочного автомата. В итоге респиратор на химически связанном кислороде при том же сроке защитного действия весит существенно меньше баллонного [2], всегда готов к оперативному применению и не требует содержания компрессорного оборудования. Изложенное позволяет главные перспективы совершенствования изолирующих средств защиты дыхания связать с химическим способом резервирования кислорода [3]. Для этого необходимо повысить эффективность использования защитного ресурса регенеративного патрона. Обоснование необходимых для этого изменений конструкции дыхательного аппарата и количественная оценка результатов от их внесения – *цель данного исследования*.

**Методика исследований.** Изложим причины неэффективного использования защитного ресурса регенеративного патрона и способ их устранения. Лимитирующей стадией хемосорбции углекислого газа является диффузия его молекул внутрь гранул кислородсодержащего продукта. Под действием экзотермического тепла (см. (1)) гранулы могут спекаться. Их поры при этом закрываются, и защитный ресурс остается неиспользованным [4]. Наибольшему риску подвергаются расположенные на входе в регенеративный патрон лобовые слои кислородсодержащего продукта, ибо там вначале работы дыхательного аппарата максимальный концентрационный напор углекислого газа сочетается с максимальной неизрасходованной сорбционной емкостью гранул [5, 6].

Вторая причина неэффективного использования защитного ресурса – так называемый мертвый слой хемосорбента. Даже при отсутствии спекания гранул полностью химически связанный кислород прореагирует лишь тогда, когда все 4 % углекислого газа в выдыхаемом человеком воздухе начнут беспрепятственно преодолевать регенеративный патрон. Очевидно, это происходит позже времени наступления критического 1,5 % проскока  $\text{CO}_2$ , по достижении которого заканчивается срок защитного действия дыхательного аппарата, ибо начинается отравление углекислым газом. Не прореагировавшие к этому моменту молекулы надпероксида калия расположены в основном в замыкающих слоях кислородсодержащего продукта [7]. Их количество и характеризуется толщиной мертвого слоя хемосорбента, который мог бы получиться из гранул, образованных только из таких (не прореагировавших) молекул.

Предотвращать спекание гранул и истончать их мертвый слой можно внесением изменений в конструкцию дыхательного аппарата, обеспечивающих более быстрое протекание выдыхаемого

мого воздуха через наиболее нагруженные лобовые слои гранул и замедление фильтрации в конце регенеративного патрона. Первое сокращает время контакта реагентов, обеспечивая проникновение углекислого газа вглубь регенеративного патрона, и способствует более равномерному распределению источников экзотермического тепла. Второе компенсирует снижение концентрационного напора в замыкающих слоях кислородсодержащего продукта увеличением времени пребывания в них молекул  $\text{CO}_2$ .

Основная идея изобретения (патент 23 426 Украина, А 62 В 7/08 «Изолирующий дыхательный аппарат», авторы – С.Г. Ехилевский, В.В. Пак, Э.Г. Ильинский) заключается в том, чтобы через скоростные участки пропускать воздух импульсно (порция, пауза, порция и т. д.). Это позволяет совместить сохранение расхода воздуха с уменьшением скорости его течения при переходе из передних слоев сорбента в замыкающие. Дыхательный аппарат (рис. 1) включает в себя шланг выдоха 1, регенеративный патрон с сорбентом углекислого газа, разделенный по ходу течения выдыхаемого воздуха на два последовательно соединенных объема 2 и 3, дыхательный мешок, который состоит из упругой емкости избыточного давления 4 с клапаном выдоха 5, соединяющей первый и второй объемы сорбента, отдельной упругой емкости недостаточного давления 6, расположенной перед шлангом вдоха 7 с клапаном вдоха 8, и лицевую часть 9.

Воздух, проходящий через первый объем сорбента 2 только на выдохе, попадает через клапан выдоха 5 в упругую емкость выдоха 4. Перепад давления между ней и упругой емкостью вдоха 6 непрерывно фильтрует воздух через второй объем сорбента 3. Последнее обеспечено упругостью обеих емкостей дыхательного мешка. Из емкости вдоха 4 через клапан вдоха 8 воздух по шлангу вдоха 7 попадает в легкие, после чего цикл замыкается.

Поскольку вдох и выдох примерно равны по длительности, в объеме сорбента 2 скорость течения воздуха в момент выдоха примерно вдвое больше скорости установившегося течения воздуха в объеме сорбента 3. При этом благодаря отсутствию пульсации давления скорость фильтрации воздуха в объеме сорбента 3 оказывается ниже, чем в неразрезанном патроне.

Чтобы обосновать координату разрезания патрона и оценить снижение мощности источников экзотермического тепла в лобовых слоях кислородсодержащего продукта, потребуется математическая модель динамической сорбционной активности при наличии скачка скорости фильтрации регенерируемого воздуха. Очевидно, концентрация углекислого газа на входе во вторую часть патрона медленно возрастет по мере постепенной отработки поглотительного ресурса первой части. Это позволяет воспользоваться развитой в [8] концепцией квазистационарного профиля концентрации углекислого газа в задаче динамики сорбции при наличии нестационарного граничного условия на входе в поглощающий слой.

Универсальность полученных в [8] соотношений достигается описанием процесса регенерации воздуха в терминах обезразмеренных и приведенных величин. Что позволяет моделировать изолирующие средства защиты дыхания в различных режимах их эксплуатации, определяемых уровнем физической нагрузки человека. Выберем в качестве характерного масштаба объемной концентрации молекул  $\text{CO}_2$   $W$  ее максимальное значение  $W_0$  на входе в регенеративный патрон. Тогда, согласно [8], приведенная концентрация молекул  $\text{CO}_2$   $\omega = W/W_0$ , как функция обезразмеренных переменных, связанных с обычными временем  $t$  и расстоянием от входа в поглощающий слой  $x$  формулами:

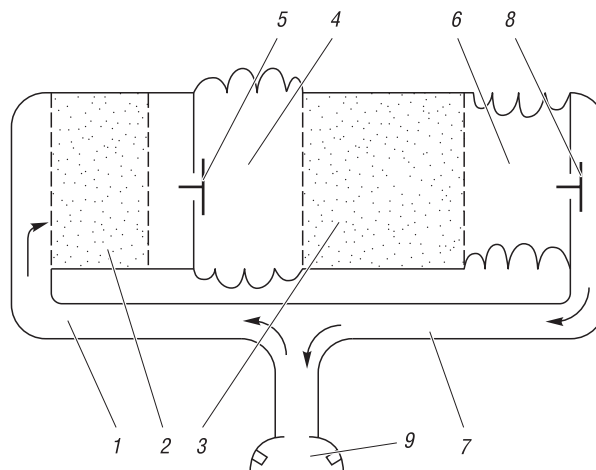


Рис. 1. Схема респиратора с разной скоростью фильтрации воздуха через лобовые и замыкающие слои кислородсодержащего продукта

Fig. 1. Scheme of the respirator with different air filtration rates through the front and final layers of the oxygen-containing product

$$\begin{aligned}\xi(x) &= \beta x / v; \\ \tau(t) &= \beta \gamma t,\end{aligned}\tag{2}$$

определяется соотношениями:

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\xi-\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(\tau)}{n!} \xi^n;\tag{3}$$

$$f_{n+1}(\tau) = \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau;\tag{4}$$

$$f_0(\tau) = e^{\tau} \omega(0, \tau);\tag{5}$$

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau,\tag{6}$$

где  $v$  – скорость фильтрации воздуха;  $\gamma$  и  $\beta$  – феноменологические постоянные, характеризующие ресурс хемосорбции и ее скорость [9];  $u$  – использованная доля ресурса хемосорбента.

Полагая, что уровень физической нагрузки человека не меняется и на вход в регенеративный патрон поступает постоянная концентрация  $\text{CO}_2$  ( $\omega(0, \tau) = 1$ ), с помощью (2)–(6) получим величину проскока  $\text{CO}_2$  и долю отработанного хемосорбента для патрона без скачка скорости фильтрации:

$$\omega_0(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \left( 1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right];\tag{7}$$

$$u_0(\xi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \left( 1 + e^{-\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \right).\tag{8}$$

Самоспасатели предназначены для покидания опасной зоны людьми, оказавшимися в чрезвычайной ситуации, что не предполагает значительной физической нагрузки и не приводит к значительному выделению экзотермического тепла, пропорционального количеству выдыхаемого в единицу времени углекислого газа. Поэтому предотвращение спекания гранул кислородсодержащего продукта актуально прежде всего в респираторах с большим сроком защитного действия, предназначенных для горноспасателей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, сотрудников МЧС, аварийно-газовой службы, пожарных, занятых эвакуацией пострадавших и минимизацией последствий чрезвычайной ситуации.

Между тем величина мертвого слоя хемосорбента, расположенного в замыкающей части фильтра, практически не зависит от обезразмеренной длины регенеративного патрона. Поэтому его доля в общем количестве химически связанного кислорода велика в аппаратах с небольшим сроком защитного действия. Например, в очень коротком патроне (когда проскок  $\text{CO}_2$  с самого начала работы будет превышать критический) весь слой хемосорбента окажется мертвым.

В свете изложенного максимальный эффект от предложенных в патенте 23 426 изменений конструкции дыхательного аппарата будет в респираторах со средним сроком защитного действия и тяжелым режимом эксплуатации (с высоким уровнем физической нагрузки человека). Таким требованиям удовлетворяет изолирующий дыхательный аппарат на химически связанном кислороде РХС [2]. Он снаряжен 2400 г кислородсодержащего продукта на основе надпероксида калия. Согласно экспериментальным данным, плотность упаковки гранул кислородсодержащего продукта слабо зависит от объема регенеративного патрона и примерно равна 930 г/л [9]. Значит, объем регенеративного патрона РХС составляет  $2400/930 = 2,58$  л. При этом на пустоты между гранулами приходится около трети объема регенеративного патрона  $2,58/3 = 0,86$  л. По этим каналам выдыхаемый воздух обтекает гранулы, а внутрь их пор молекулы  $\text{CO}_2$  попадают по законам молекулярной диффузии.

В десятом (тяжелом) режиме физической нагрузки модели рабочего процесса в РХС соответствует обезразмеренная длина  $\eta = 7,5$  [9]. При этом горноспасатель потребляет около 60 л воздуха в минуту, осуществляя 30 вдохов-выдохов [2]. То есть объем каждого выдоха примерно равен 2 л.

Чтобы мало влиять на среднее время пребывания молекул  $\text{CO}_2$  в первой части регенеративного патрона, часть выдоха, остающаяся между двумя выдохами в первой части патрона, должна быть на порядок меньше общего объема одного выдоха. То есть общий объем пустот первой части не должен превышать 0,2 л, что соответствует обезразмеренной длине первой части  $\zeta = 7,5 \cdot 0,2/0,86 = 1,74$ , ибо обезразмеренная длина при постоянной скорости фильтрации пропорциональна объему регенеративного патрона или (при данной плотности упаковки гранул) объему пустот между ними. В связи с изложенным первую часть регенеративного патрона в дальнейшем будем называть короткой.

Поскольку вдох и выдох примерно равны по длительности, 2 л воздуха преодолевают вход в первую часть патрона за 1 с. Суммарный объем пустот между находящимися в ней гранулами равен  $0,86 \cdot \zeta/\eta$  л. Из непрерывности воздушного потока следует, что при расходе 2 л/с время пребывания молекул воздуха в первой части патрона  $\frac{0,86 \cdot \zeta/\eta}{2} = 0,43 \cdot \zeta/\eta$  с. Последняя часть выдоха объемом  $0,86 \cdot \zeta/\eta$  л остается в первой части патрона еще на 1 с (время вдоха). То есть среднее время пребывания молекул воздуха в первой части патрона равно

$$\frac{(2 - 0,86 \cdot \zeta/\eta) 0,43 \cdot \zeta/\eta + (1 + 0,43 \cdot \zeta/\eta) 0,86 \cdot \zeta/\eta}{2}, \quad (9)$$

где  $2 - 0,86 \cdot \zeta/\eta$  – объем первой части выдоха, не остающейся в короткой части регенеративного патрона на время вдоха, л.

Чтобы использовать модель (2)–(6) с равномерной скоростью фильтрации (когда в единицу времени при начальной сорбционной емкости кислородсодержащего продукта поглощается одинаковое количество молекул  $\text{CO}_2$ ), единицу во вторых скобках в (9) нужно заменить на время регенерации остатка выдоха, стоящего на месте в короткой части патрона во время вдоха. Для вычисления этого времени необходимо количество молекул  $\text{CO}_2$ , оставшихся в остановившемся воздухе, умножить на время поглощения первой порции молекул  $\text{CO}_2$  (равное времени движения в патроне последней части выдоха  $0,43 \cdot \zeta/\eta$ ) и разделить на величину этой порции:

$$0,43 \cdot \zeta/\eta \cdot \frac{\int_0^{\zeta} e^{-\alpha \xi} d\xi}{\int_0^{\zeta} (1 - e^{-\alpha \xi}) d\xi} = 0,43 \cdot \zeta/\eta \cdot f(\alpha \zeta). \quad (10)$$

При получении (10) учтено, что, согласно (7), в начале работы регенеративного патрона спад концентрации  $\text{CO}_2$  происходит по экспоненциальному закону, в котором  $\alpha \approx 0,5$ , ибо скорость фильтрации через короткую часть патрона  $V$  при одинаковой продолжительности выдоха и вдоха примерно 2 раза выше, чем скорость  $v$  в неразрезанном патроне:

$$\frac{x\beta}{V} = \frac{x\beta}{v} \cdot \frac{v}{V} = \xi \cdot \frac{v}{V} = \xi \cdot \alpha. \quad (11)$$

С учетом изложенного время пребывания последней части выдоха в короткой части регенеративного патрона следует положить равным  $f(\alpha \zeta) \cdot 0,43 \cdot \zeta/\eta + 0,43 \cdot \zeta/\eta$  с. При этом, согласно (9)–(11),

$$\frac{(2 - 0,86 \cdot \zeta/\eta) 0,43 \cdot \zeta/\eta + (f(\alpha \zeta) \cdot 0,43 \cdot \zeta/\eta + 0,43 \cdot \zeta/\eta) 0,86 \cdot \zeta/\eta}{2} \quad (12)$$

– среднее время пребывания молекул воздуха в короткой части регенеративного патрона.

Для получения аналогичного показателя в неразрезанном патроне следует положить  $\zeta = \eta$ , убрать  $\alpha$  и с учетом частичного демпфирования скачков скорости фильтрации упругостью шлангов вдоха-выдоха в  $\varepsilon$  раз ( $1 < \varepsilon < 2$ ) увеличить время проникновения данной молекулы воздуха через патрон:

$$\varepsilon \cdot \frac{(2 - 0,86) 0,43 + (f(\eta) \cdot 0,43 + 0,43) 0,86}{2}. \quad (13)$$



Если упругости шлангов нет (во время вдоха опорожняется дыхательный мешок, а воздух в патроне стоит на месте), то  $\varepsilon = 1$ . В другой предельной ситуации ( $\varepsilon = 2$ ), реализуемой для второй части регенеративного патрона, воздух фильтруется без остановок с в 2 раза меньшей скоростью, чем через короткую часть патрона во время выдоха. По этой причине при подсчете времени пребывания молекулы воздуха во второй части патрона нужно в (12) опустить первое слагаемое во вторых скобках, заменить  $\zeta$  на  $\eta - \zeta$  и подставить  $\varepsilon = 2$ :

$$2 \cdot \frac{(2 - 0,86 \cdot (\eta - \zeta)/\eta) 0,43 \cdot (\eta - \zeta)/\eta + (0,43 \cdot (\eta - \zeta)/\eta) 0,86 \cdot (\eta - \zeta)/\eta}{2} = 2 \cdot 0,43 \cdot (\eta - \zeta)/\eta. \quad (14)$$

В частности, если в (14) положить  $\zeta = 0$ , получим  $2 \cdot 0,43$  – время пребывания молекул в патроне при равномерной безостановочной фильтрации 2 л воздуха за время каждого вдоха-выдоха, длящегося 2 с, что согласуется с изложенным в абзаце перед формулой (9).

Таким образом, через короткую часть патрона регенерируемый воздух фильтруется существенно быстрее, а через вторую (длинную) часть – незначительно медленнее, чем через неразрезанный патрон. При этом в терминах обезразмеренных переменных (см. (2)) первая часть патрона становится короче, а ход времени в ней как бы замедляется. Ибо в соответствии с обоснованным в [10] принципом песочных часов на вдохе время как бы замирает, поскольку в патрон не поступают молекулы  $\text{CO}_2$ :

$$\omega_1(\xi, \tau) = \omega_0(\alpha \xi, \alpha \tau) \quad (0 \leq \xi \leq \zeta), \quad (15)$$

$$u_1(\xi, \tau) = u_0(\alpha \xi, \alpha \tau) \quad (0 \leq \xi \leq \zeta), \quad (16)$$

где  $\omega_1$  и  $u_1$  – приведенная концентрация  $\text{CO}_2$  и использованная доля ресурса хемосорбента в первой части регенеративного патрона;  $\alpha$  – введенный в (10) параметр, точное значение которого, в соответствии с изложенным (см. (11)–(13)), является корнем трансцендентного уравнения<sup>1</sup>

$$\alpha = \frac{(2 - 0,86 \cdot \zeta/\eta) 0,43 \cdot \zeta/\eta + (f(\alpha \zeta) \cdot 0,43 \cdot \zeta/\eta + 0,43 \cdot \zeta/\eta) 0,86 \cdot \zeta/\eta}{\frac{\zeta}{\eta} \cdot \varepsilon \cdot \frac{(2 - 0,86) 0,43 + (f(\eta) \cdot 0,43 + 0,43) 0,86}{2}}. \quad (17)$$

Аналогично с учетом (14) получим  $\omega$  и  $u$  во второй части патрона:

$$\omega_2(\xi, \tau) = \omega(\gamma(\xi - \zeta), \gamma \tau) \quad (\zeta < \xi \leq \eta), \quad (18)$$

$$u_2(\xi, \tau) = u(\gamma(\xi - \zeta), \gamma \tau) \quad (\zeta < \xi \leq \eta), \quad (19)$$

где

$$\gamma = \frac{2 \cdot 0,43 \cdot (\eta - \zeta)/\eta}{\frac{\eta - \zeta}{\eta} \cdot \varepsilon \cdot \frac{(2 - 0,86) 0,43 + (f(\eta) \cdot 0,43 + 0,43) 0,86}{2}}, \quad (20)$$

а в качестве граничного условия в (5) при вычислении представленной в (18)  $\omega(\xi, \tau)$  должен фигурировать проскок через первую часть патрона:

$$\omega(0, \tau) = \omega_1(\zeta, \tau) = \omega_0(\alpha \zeta, \alpha \tau), \quad (21)$$

при этом

$$f_0(\tau) = \omega_1(\zeta, \tau) \cdot e^\tau. \quad (22)$$

Для проведения численных экспериментов полученные при наличии скачка скорости зависимости приведенной концентрации  $\text{CO}_2$  в токе воздуха и использованной доли ресурса хемосорбента (см. (15), (16), (18), (19)) были сшиты с помощью функций Хевисайда:

$$\tilde{\omega}(\xi, \tau) = \omega_1(\xi, \tau)\theta(\zeta - \xi) + \omega_2(\xi, \tau)\theta(\xi - \zeta) \quad (0 < \xi \leq \eta), \quad (23)$$

$$\tilde{u}(\xi, \tau) = u_1(\xi, \tau)\theta(\zeta - \xi) + u_2(\xi, \tau)\theta(\xi - \zeta) \quad (0 < \xi \leq \eta). \quad (24)$$

<sup>1</sup> Смысл (17) в том, что при одинаковой толщине поглощающего слоя скорости фильтрации обратно пропорциональны времени его преодоления.

**Результаты и их обсуждение.** Поскольку демпфирование скачков скорости в неразрезанном патроне зависит от объема и упругости соединительных шлангов, а также от гидравлического сопротивления регенеративного патрона, были рассмотрены различные  $\varepsilon$ . Вычисления по формулам (23), (24) выполнялись в среде пакета MathCAD. Результаты расчетов сведены в таблицу и в графической форме представлены на рис. 2, 3.

$\varepsilon$	$\zeta$	$\partial u_0(0, \tau) / \partial \tau _{\tau=0}$	$\frac{\partial \bar{u}(0, \tau) / \partial \tau _{\tau=0}}{\partial \bar{u}(\zeta, \tau) / \partial \tau _{\tau=0}} =$	$\bar{u}(\tau_k) / \bar{u}_0(\tau_k)$
1,4	0,723	1	0,762	1,065
1,6	0,794	1	0,677	1,029
1,8	0,856	1	0,611	0,993

В частности, для  $\varepsilon = 1,6$  видно (см. рис. 2), что в патроне со скачком скорости фильтрации связанные молекулы  $\text{CO}_2$ , а значит, и источники экзотермического тепла (см. (1)) распределены более равномерно. Благодаря этому тепловая мощность процесса в лобовых (наиболее подверженных спеканию) слоях кислородсодержащего продукта снижается на 32,3 %. При этом до 2,9 % (колонка 5 таблицы) возрастает использование защитного ресурса регенеративного патрона, характеризующее его средней (по координате) отработкой  $\bar{u}(\tau_k)$  к моменту наступления критического проскока  $\text{CO}_2$ . Это проявляется в более медленной эволюции проскока  $\text{CO}_2$  (см. рис. 3), что обеспечивает комфортные условия дыхания в течение всего срока защитного действия респиратора. Эффект достигается за счет истончения мертвого слоя хемосорбента, то есть без дополнительного расходования кислородсодержащего продукта на снаряжение регенеративного патрона. Причина состоит в более медленной (по сравнению с неразрезанным патроном) фильтрации через вторую часть патрона. При этом снижение скорости хемосорбции в первой (короткой) части патрона слабо влияет на величину средней отработки  $\bar{u}(\tau_k)$ , ибо лобовые слои кислородсодержащего продукта дольше в работе, чем замыкающие, в которых в основном и сосредоточен мертвый слой сорбента.

Обезразмеренная координата места скачка скорости  $\zeta$  определялась из условия равенства скоростей роста загрязненности лобовых слоев первой  $\partial u(0, \tau) / \partial \tau|_{\tau=0}$  и второй  $\partial u(\zeta, \tau) / \partial \tau|_{\tau=0}$  частей регенеративного патрона в начале его работы, когда максимальный концентрационный напор  $\text{CO}_2$  сочетается с неизрасходованной сорбционной емкостью кислородсодержащего продукта.

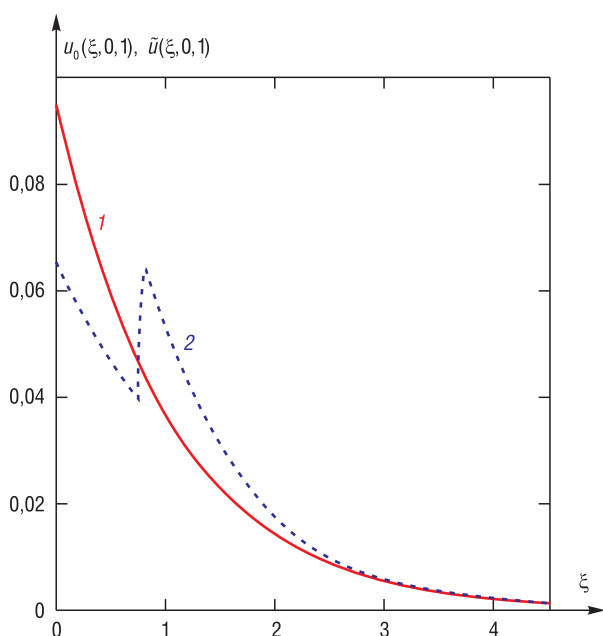


Рис. 2. Распределение связанного углерода в неразрезанном патроне (кривая 1) и в патроне со скачком скорости фильтрации (кривая 2)

Fig. 2. The distribution of bound carbon in the uncut cartridge (curve 1) and in the cartridge with a jump in the filtration rate (curve 2)

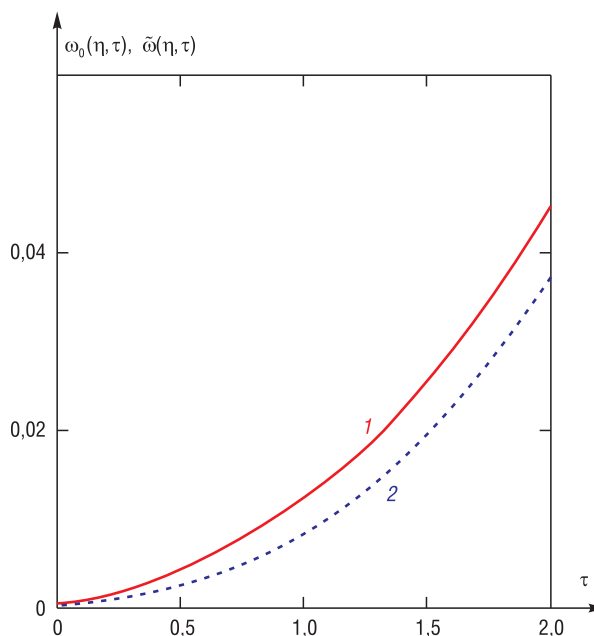


Рис. 3. Эволюция проскока  $\text{CO}_2$  через неразрезанный патрон (кривая 1) и со скачком скорости фильтрации (кривая 2)

Fig. 3. Evolution of  $\text{CO}_2$  penetration through the uncut cartridge (curve 1) and with a jump in the filtration rate (curve 2)

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных в патенте 23426 технических решений и допускают разумную интерпретацию. Видно (см. столбец 2 таблицы), что  $\zeta$  тем больше, чем значительнее характеризуемое  $\varepsilon$  демпфирование скорости в однородном патроне. Это приводит к большему увеличению скорости фильтрации через первую часть патрона и, соответственно, возрастанию через нее проскока  $\text{CO}_2$ . Поэтому, чтобы не допустить спекания гранул на входе во вторую часть патрона, длину первой части необходимо увеличивать. Использование ресурса мертвого слоя при этом снижается (см. столбец 5 таблицы), ибо при значительном демпфировании скачков скорости фильтрации в однородном патроне течение воздуха мало отличается от равномерного, имеющего место во второй части патрона. Однако это не снижает важности предложенных в [2] изменений конструкции респиратора, так как главный приоритет, обеспечиваемый скачком скорости фильтрации, – это предотвращение послойного спекания продукта, влекущего выход из строя дыхательного аппарата в зоне чрезвычайной ситуации при значительной физической нагрузке человека.

**Заключение.** Таким образом, в работе предложена математическая модель процесса регенерации воздуха в изолирующем дыхательном аппарате на химически связанном кислороде с неравномерной скоростью фильтрации выдоха через регенеративный патрон. Получены зависимости от координаты и времени концентрации молекул  $\text{CO}_2$  в воздушном потоке и доли использования защитного ресурса регенеративного патрона. С помощью численных экспериментов определена оптимальная для предотвращения спекания гранул координата скачка скорости фильтрации воздушного потока. В зависимости от величины демпфирования давления на выдохе и вдохе для респиратора РХС определен прирост защитного действия аппарата и снижение мощности источников экзотермического тепла в лобовых слоях кислородсодержащего продукта.

Полученные результаты подтверждают эффективность технических решений, обеспечивающих более быстрое импульсное пропускание выдыхаемого воздуха через лобовые слои хемосорбента и его медленную равномерную фильтрацию через остальную часть регенеративного патрона. Благодаря таким усовершенствованиям могут быть повышены надежность изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде и эффективность использования их защитного ресурса.

### Список использованных источников

1. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования : учеб. пособие / С. В. Гудков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2008. – 188 с.
2. Диденко, Н. С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н. С. Диденко. – М.: Недра, 1990. – 160 с.
3. Гудков, С. В. Преимущества использования изолирующих самоспасателей с химически связанным кислородом в угольных шахтах / С. В. Гудков, В. Г. Матвейкин, Г. Г. Шаповалов // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 11. – С. 40–44.
4. Ехилевский, С. Г. Повышение ресурса дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С. Г. Ехилевский. – Днепрпетровск, 2002. – 36 с.
5. Майстренко, А. В. Моделирование дыхательных изолирующих аппаратов на химически связанном кислороде / А. В. Майстренко, Н. В. Майстренко, О. И. Ерохин // Науч. ведомости Белгород. гос. ун-та. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2014. – № 14 (172). – В. 29/1. – С. 81–87.
6. Балабанов, П. В. Идентификация параметров математических моделей регенерации воздуха средствами защиты изолирующего типа / П. В. Балабанов, А. А. Кримштейн, С. В. Пономарев // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 6, № 7. – С. 68–73.
7. Ехилевский, С. Г. Резервы более полного использования химически связанного кислорода в шахтных дыхательных аппаратах / С. Г. Ехилевский // Изв. Донец. горн. ин-та. – 1998. – № 1. – С. 17–26.
8. Ехилевский, С. Г. Влияние переменных краевых условий на квазистационарный профиль концентрации  $\text{CO}_2$  в регенеративном патроне шахтного респиратора / С. Г. Ехилевский, С. . Олышаников, Е. П. Потапенко // Изв. вузов. Горн. журн. – 2013. – № 3. – С. 46–53.
9. Значения феноменологических параметров модели хемосорбции в регенеративных патронах шахтных респираторов / В. В. Пак [и др.] // Изв. вузов. Горн. журн. – 1998. – № 11–12. – С. 108–112.
10. Ехилевский, С. Г. Нестационарная задача динамики сорбции углекислого газа в регенеративном патроне изолирующего респиратора / С. Г. Ехилевский // Вестн. Фонда фундаментальных исследований. – 2019. – № 3 (89). – С. 57–65.



## References

1. Gudkov S. V., Dvoreczkij S. I., Putin S. B., Tarov V. P. *Self-Contained Breathing Apparatus and Principles of their Design*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 188 p. (in Russian).
2. Didenko N. S. *Regenerative Respirators for Mine Rescue*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 158 p. (in Russian).
3. Gudkov S. V., Matvejkin V. G., Shapovalov G. G. Advantages of using insulating self-rescuers with chemically bound oxygen in coal mines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*, 2012, no. 11, pp. 40–44 (in Russian).
4. Ekhilevskii S. G. *Increasing the Life of Breathing Apparatus on Chemically Bound Oxygen*. Dnepropetrovsk, 2002. 36 p. (in Russian).
5. Majstrenko A. V., Majstrenko N. V., Erokhin O. I. Simulation of breathing isolating devices on chemically bound oxygen. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Istorija. Politologiya. Ekonomika. Informatika* [Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: History. Political Science. Economy. Informatics], 2014, no. 14 (172), iss. 29/1, pp. 81–87 (in Russian).
6. Balabanov P. V., Krimshitejn A. A., Ponomarev S. V. Identification of parameters of mathematical models of air regeneration by means of protection of insulating type. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Voronezh State Technical University Bulletin], 2010, vol. 6, no. 7, pp. 68–73 (in Russian).
7. Ekhilevskiy S. Reserves for more complete utilization of chemically bound oxygen in mine breathing apparatus. *Izvestiya Donetskogo gornogo instituta = Bulletin of the Donetsk Mining Institute*, 1998, no. 1, pp. 17–26 (in Russian).
8. Ekhilevskiy S. G., Olshaniuk S. A., Potapenko E. P. Influence of variable boundary conditions on the quasi-stationary profile of CO<sub>2</sub> concentration in the regenerative cartridge of the mine respirator. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2013, no. 3, pp. 46–53 (in Russian).
9. Pak V. V., Ekhilevskiy S. G., Il'inskii E. G., Konopel'ko E. I. Values of the phenomenological parameters of the chemisorption model in regenerative cartridges of mine respirators. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1998, no. 11–12, pp. 108–112 (in Russian).
10. Ekhilevskiy S. G. Nonstationary problem of the dynamics of carbon dioxide sorption in a regenerative cartridge of an insulating respirator. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, 2019, no. 3 (89), pp. 57–65 (in Russian).

## Информация об авторах

*Ехилевский Степан Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий программирования, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: ekhilevskiy@yandex.ru

*Потапенко Евгений Павлович* – ведущий инженер, унитарное предприятие «Витебскоблгаз» (ул. Правды, 36, 210029, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: p0tapenko@mail.ru

## Information about the authors

*Stepan G. Ekhilevskiy* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Programming Technologies, Polotsk State University (29, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ekhilevskiy@yandex.ru

*Evgeniy P. Potapenko* – Lead Engineer, Unitary Enterprise “Vitsebskoblgaz” (36, Pravdy Str., 210029, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: p0tapenko@mail.ru